干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2018.05.15

则岔石林地质公园喀斯特地貌类型及形成机制①

徐家红[1]，　鄢志武[2]，　柳晓丹[3]

(1　忻州师范学院旅游管理系，山西　忻州　034000；　2　中国地质大学(武汉)经济管理学院，湖北　武汉　430000；
3　武警黄金第七支队，山东　烟台　264000)

摘　要: 则岔石林地质公园位于甘肃省碌曲县，该处地貌完整地保存了高寒喀斯特的特征，具有典型性与稀有性。为了揭示其自然科学价值，促进自然资源开发与景观保护，基于前人工作基础，通过野外地质调查，以碌曲县区域地学为背景，介绍了则岔石林地质公园的喀斯特地貌类型，即以高原石林为主，一线天为亮点，小型溶洞为辅。继而从地质构造、岩性、水文气候、生物因素四方面分析了园内喀斯特地貌的形成机制。对完善我国高海拔地区岩溶系列地质遗迹的科学研究具有一定意义。同时，高寒喀斯特的生态化对南方喀斯特沙漠化的治理具有良好的示范作用。

关　键　词: 喀斯特地貌；形成机制；石林；青藏高原东部；碌曲

中图分类号: P931.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000－6060(2018)05－1027－08(1027～1034)

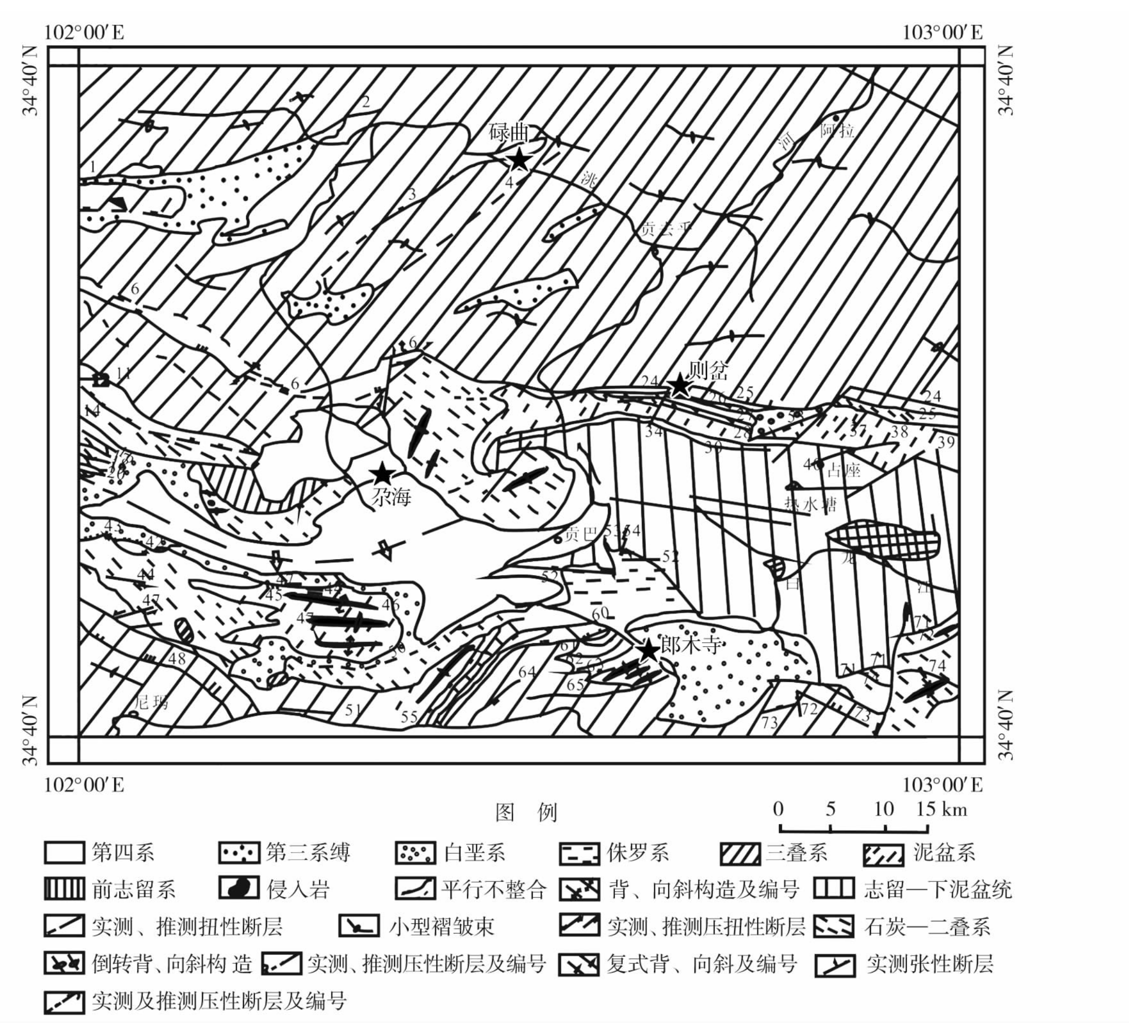
高寒的青藏高原喀斯特是中国所特有，但目前国内外对中国喀斯特地貌的研究主要集中在热带、亚热带地区，尤其是路南石林，而对青藏高原及其东邻地区高海拔喀斯特景观研究极少。碌曲县地处甘肃省甘南藏族自治州，位于青藏高原东部边缘的甘、青、川三省交界地区，海拔 2 900～4 300 m，被誉为“中国的小西藏，甘肃的后花园”。全县总面积 5 298.6 km^2，以尕海——则岔国家级自然保护区闻名全国。则岔石林地质公园位于碌曲县东南 52 km 的拉仁关乡境内，地理坐标 34°14′10″～34°30′30″N，102°37′23″～102°45′00″E，海拔 3 500～4 100 m，被美誉为“高原仙境”。景区全长 22 km，总面积 214 km^2，其中石林面积约 45 km^2，交通便利。因特殊的地理位置和典型的地貌景观，则岔石林地质公园是中国南、北方岩溶地貌进行系统对比研究的极佳场所。通过野外地质调查，介绍了则岔石林地质公园的喀斯特地貌类型并探索了其形成机制，丰富和完善了我国高海拔地区岩溶地质系列地质遗迹的科学研究。

1　地质背景

碌曲县地处青藏高原东部边缘向陇南山地和黄土高原的过渡带，则岔石林地质公园南、北纵跨巴颜喀拉板块和西秦岭地块中—南带。该地区经历了漫长的地质演化史。从距今 438 Ma 年的志留纪—泥盆纪—石炭纪—三叠纪—新近纪，经历加里东运动、海西运动、燕山运动和喜马拉雅造山运动，由深海盆地火山沉积环境—半闭塞海湾相不稳定沉积环境—浅海相半封闭泻湖港湾沉积环境—碳酸盐台地边缘沉积环境—陆相沉积环境，进入了第四纪[1]。研究区内褶皱发育，除了诸多背斜、向斜(包括复式背、向斜和倒转背、向斜)，还有不少小型褶皱束。断层也十分发育，主要呈 NE、NNE 与近 EW 向展布(图 1)。

岔石林地质公园属沉积岩分布区，广泛发育志留系、泥盆系、石炭系、三叠系、新近系和第四系沉积地层，侵入岩和变质岩较少。迭山推附体北侧为西秦岭中带裂陷槽，广泛分布三叠系地层，表现为裂槽肩部斜坡相—槽底盆缘相复理式浊流沉积。区内山间盆地出露少量白垩系地层。河流沟谷地区分布新近系和第四系松散沉积物；南侧为巴颜喀拉区东北缘前陆盆地，以碳酸盐岩浊积岩为主。泥盆系和三叠系石灰岩及板岩构成了地质公园的主体。其中，泥盆系地层主要分布于园区南部，三叠系地层分布于西秦岭南部迭山推覆构造带两侧，主要位于则岔

① 收稿日期：2018－04－15；　修订日期：2018－07－15
基金项目：甘肃碌曲国家地质公园调研及规划设计(108－KH116312)
作者简介：徐家红(1986－)，女，硕士，助教，主要从事旅游地理方面的研究和教学. E-mail:jhxu0821@163.com
通讯作者：鄢志武(1963－)，男，硕士，教授，主要从事旅游地学、地质公园方面的研究和教学. E-mail:jhxu0821@cug.edu.cn



注:该图在区调图的基础上绘制

图 1 碌曲县区域地质略图

Fig. 1 Regional geological sketch of Luqu County

及其以北地区[2]。

2 喀斯特地貌类型

则岔石林地质公园现存地质遗迹景点众多,奇峰怪石、山岩陡壁,保存完整,融蓝天碧水、森林草地、溪流瀑布于一体(图 2),“奇石、幽谷、青山、秀水、蓝天、白雪”等多种景观组合,独具特色,既具有北国之雄,又兼具南国之秀,既有桂林山水的特质,又有张家界石林恢弘的魅力。得天独厚的自然旅游资源与以藏传佛教文化和格萨尔王文化为主的人文景观融为一体,生态与人类文明共生的九色香巴拉,是不可多得的观光旅游、休闲度假、科研教学的圣地。则岔石林地质公园主要分为三个地质遗迹景观区,即:则岔河谷地质旅游景区、则岔石林地质旅游景区、南部高山草原地质旅游景区,其中,石林景区是品牌旅游产品。园内喀斯特地貌可分为三大类型。

2.1 石林

则岔石林千姿百态,无奇不有。虎头峰、骆驼峰、雄狮峰、龟峰、将军峰、寿星爷、拜佛石、富士山、猴子望月、金蛙高歌、朝圣西进、玉女老妪等,各种动物、人物造型,形神兼备,惟妙惟肖。石柱或列队成阵,或傲然独立,展示着一种广阔雄壮的磅礴之美。

根据不同的分类标准[3](表 1),可将则岔石林划分为不同类型。如果按高度分类,则岔石林都在 20 m 以上,最高达 50 m,属特高石林;按面积分类,则岔石林面积约 45 km^2,属于大石林;按密度分类,则岔石林除某些石柱林立之外,大部分间隔较大,属于疏石林;按颜色分类,则岔石林属于灰石林;按母岩时代及岩性分类,则岔石林为泥盆纪和三叠纪石灰岩石林;按形态分类,则岔石林属于柱状石林;按



图 2　则岔石林地质公园景观

Fig. 2　Landscape of Zecha Shilin Geopark

表 1　喀斯特石林景观分类

Tab. 1　Classification of Karst stone forest landscape

分类标准	类型				
高度 / m	5 ~ 10, 极个别超过 10	10 ~ 20	15 ~ 25, 25% 以上 20 ~ 30	20, 20% 超过 30	
	低石林	较高石林	高石林	特高石林	
面积 / km^2	小于 0.001	0.001 ~ 1	1 ~ 10	10 ~ 100	大于 100
	微石林	小石林	中等石林	大石林	特大石林
海拔 / m	3 500 以上	1 500 ~ 3 500	500 ~ 1 500	100 ~ 500	100 以下
	极高山、高原石林	高山高原石林	中山石林	低山、丘陵石林	平原、海岸石林
疏密程度	石柱密度很高、间距小。石柱高度多在 20 m 左右,部分高达 40 m。石柱之间间隔数米	石柱之间间隔 10 ~ 30 m,石柱约占石林总面积的 20% ~ 40%	石柱密度很低,在很大范围内只有一个或几个石柱分散分布		
	密石林	疏石林	孤柱		
颜色	形成石林的石灰岩颜色以灰色为主	灰岩为灰黑色,在灰岩表面常有藻类使灰岩颜色更显发黑	形成石林的石灰岩颜色以红色、棕红色为主	形成石林的石灰岩颜色以灰白色为主,常轻度变质为大理岩	
	灰石林	黑石林	红石林	白石林	
母岩时代	寒武纪石林	奥陶纪石林	志留纪石林	泥盆纪石林	
	石炭纪石林	二叠纪石林	三叠纪石林		
形态	剑状石林	刀脊状石林	柱状石林	城堡状石林	蘑菇状石林
	混合型				
成因	地表降水溶蚀型石林	土下、地表溶蚀型石林	埋藏型石林	寒冻风化型石林	

表 2　青藏地区喀斯特石林景观

Tab. 2　Karst stone forest landscape in Qinghai-Tibet region

名称	地区	海拔 / m	石柱高度 / m	石柱类型	成景岩石地层时代	岩性
互助北山石林	青海互助	2 100 ~ 4 308	5 ~ 15	柱状	J	灰岩
则岔石林	甘肃碌曲	3 500 ~ 4 100	20 ~ 50	柱状	D、C、T	灰岩、板岩
岗托石林	西藏昌都	4 600	5 ~ 25	柱状、屏风状	J_2	灰岩
泥马岭石林	西藏左贡	4 750	5 ~ 30	柱状、堡垒状	T	结晶灰岩
业纳山口石林	西藏邦达	4 750	5 ~ 30	柱状	Pz_2	灰岩
则布日石林	西藏定日	5 600	5 ~ 30		E_{1-2}	厚层灰岩
安多北山石林	西藏安多	4 800 ~ 5 150	3 ~ 8	柱状	E_{1-2}	灰岩、泥灰岩

成因分类，则岔石林为地表降水溶蚀兼具寒冻风化型石林。

值得一提的是，青藏地区是世界最高的喀斯特景观分布区，高寒的青藏高原喀斯特是中国所特有[4]。而则岔石林地处青藏高原东部边缘，海拔 3 500 ~ 4 100 m，气候高寒阴湿，按石林所处海拔高度分类，属于高原石林。在我国青藏地区发现的 7 处喀斯特石林景观中[5]（表 2），则岔石林面积最大，石柱高度最高，且完整地保存了高寒喀斯特的特征，其典型性与稀有性可见一斑。

2.2　峡谷

著名的则岔大峡谷——宝剑峡，又名一线天，是则岔石林景区三道石门中的头道石门，也是则岔石林地质公园的招牌景观（图 2）。壁立千仞、刀劈斧削般的一线天素有“金剑劈峰”之说，这与当地古老而神秘的格萨尔王文化息息相关。宝剑峡长约 150 m，高百米，最宽处十余米，最窄处只有几米。直立崖壁岩层发生紧密褶曲，形如波浪（图 3）。峡谷之中，悬崖耸立，古松倒挂，乱云飞渡，苍鹰盘旋，极为壮观。百米木栈道下，则岔河流水穿石门而过，愈往里愈险，风景愈奇特，总给游客“柳暗花明又一村”的惊喜感。

2.3　溶洞

园内有多处小型溶坑、溶洞，如神仙洞、鸟儿洞、石门洞等。神仙洞（照片 4）被当地藏民称之为“得茂去乎奈”，深约 50 m，高 1.5 ~ 2.5 m，宽 1 ~ 2 m，最宽处 1 ~ 8 m 形成大厅，并有支洞和天井，地形曲折。洞壁上有各种光怪陆离的图案，还有悬垂的化石，当地人传说是大象的肝肺、白度母的华盖。石门洞位于一巨大石壁下，需持手电筒进入，否则寸步难行，游人可进入约 200 m，但由于洞内缺氧，不可深入。洞内有许多人们许愿敬献的花和钱币。石峰下有一些妙不可言的岩洞，或位于高处，或依临水畔，穿山透岩。洞内有经文、壁画、岩刻、彩绘神像等。这些洞穴深奥神秘，蕴含着秦汉至明清时期羌人及藏民族深厚的佛教文化，有待于开发，供游人探索。

3　形成机制

则岔石林奇在天成，美在自然。形成千姿百态的石林、峡谷、溶洞景观，其喀斯特地貌是地质构造、岩性差异、溶蚀和风化等综合作用的产物。

3.1　构造运动是喀斯特地貌形成的决定性因素

构造运动造成了地表的高低起伏，是形成地表宏观地貌特征的主导因素。断层、褶曲和节理是重要的构造行迹。断层、褶曲往往控制着大型地貌，如高原、山地、平原、盆地、峡谷、湖泊、江河等的形成，而节理往往控制着微型地貌（或造型地貌、观赏地貌）的形成[6]，造就了对旅游者最具吸引力的地貌旅游资源。碳酸盐岩中节理的发育程度直接控制着喀斯特造型地貌的形成。则岔石林地质公园喀斯特地貌正是加里东运动、海西运动、燕山运动和喜马拉雅造山运动的产物。

本区在加里东晚期仍处于大洋环境，泥盆纪末期由于受海西运动的影响，处于大面积海退环境。石炭纪时期，本区属阳光充足、海水清淡的碳酸盐台地边缘沉积环境。三叠纪时期，受燕山运动的影响，晚期隆起为陆地，接受陆相沉积。大约在距今 50 Ma 的古近纪时期，印度板块自南向北俯冲到亚欧板块之下，致使喜马拉雅山崛起为世界屋脊。喜马拉雅运动不但造就了中国大陆西高东西的三级阶梯，也是各类造型地貌形成的内动力地质条件[7]。喜马拉雅运动第一幕（始新世末期）和第二幕（中新世中后期）使中国大陆形成了一个统一的夷平面[8]，长时期的剥蚀使碳酸盐岩地层暴露地表，为形成喀斯特景观创造了优良的条件。中国大部分喀斯特峡



图 3　一线天崖壁褶曲

Fig. 3　Fold on the precipice of the thin strip of sky

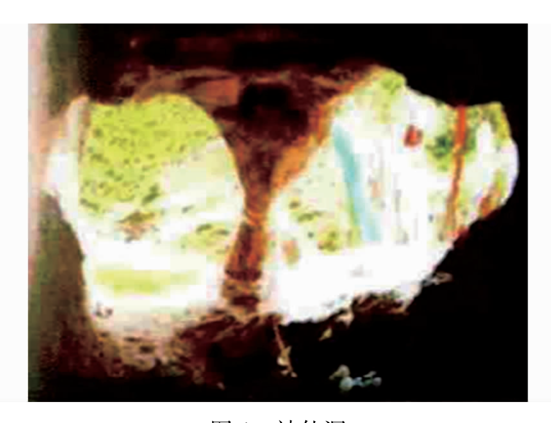


图 4　神仙洞

Fig. 4　Fairy cave



图 5　岩石断层擦痕面与垂直节理

Fig. 5　Fault slickenside and vertical joint on the rock

谷、天坑、峰林、峰从、石林都是喜马拉雅运动第三幕(上新世—早更新世)的产物,是在其运动抬升过程中溶蚀、侵蚀形成的[9]。则岔地区在古生代、中生代、新生代时期经历了多次地壳运动。造山运动基本上奠定了本区的构造格局。如图 2 所示,县域内断层、褶皱十分发育,而则岔区内断层发育,主要呈 NNE 向、NE 向与近 EW 向展布,其性质以扭性、压扭性为主,张性为次。呈 NW-SE 走向的 4 条断裂控制了则岔沟谷的走向。强烈的地壳运动使区域地层,特别是泥盆系地层发生了一系列的断裂和褶皱,同时派生出节理裂隙,则岔区域近 EW 向与 NNE 向形成近“+”形共轭节理,成为地表水和地下水最易通过的通道,岩溶水沿节理裂隙不断下切扩溶,使空隙越来越大,将岩体切割成不同的块体,加上溶蚀崩塌和重力崩塌作用,脆性的石灰岩褶皱、断裂构造发育,形成陡峻的山峰、深切的峡谷。著名的一线天就是其中之一,它由 NE 向平推断层与另一 NW-SE 向逆断层相交错断形成,受重力与水的作用,软弱岩层被蚀空,上部厚层石灰岩因重力失衡沿断裂面发生崩塌,在岩壁上留下清晰的断层擦痕面(图 5),十分壮观。

3.2　石灰岩是喀斯特地貌形成的物质基础

岩石是地貌的物质基础。不同岩石矿物成分、结构、产状、硬度、胶结程度和水理性质的差异,导致其抗风化能力与抗外力剥蚀能力的区别,从而形成不同的地貌类型和轮廓。喀斯特地貌主要发育在碳酸盐岩分布区,这与其分布范围广和长期出露地表有关。碳酸盐类岩石包括石灰岩($CaCO_3$)、白云岩[$CaMg(CO_3)_2$]和泥灰岩(以硅铝质为主)。卢耀如通过实验得出,石灰岩的相对溶解度约为 0.8 ~ 1,白云岩为 0.4 ~ 0.7,泥灰岩多在 0.5 以下[10],因此,石灰岩最易喀斯特化。

则岔石林地质公园的主体岩层是泥盆系和三叠系的石灰岩和板岩(表 3)。园区南部的泥盆系地层发育较完整,上、中、下统齐全。中泥盆统的当多沟组(D_2d)和古道岭组(D_2g)是组成则岔石林的主体地层,主要为灰色中厚层状灰岩、泥质灰岩夹钙质板岩;上泥盆统铁山群(D_3t)为一套厚 540 m 的碳酸盐岩沉积。则岔及其以北地区的三叠系地层分布于西秦岭南部迭山推覆构造带两侧,也是形成则岔石林的主要岩层,统称为隆务河群($T_{1-2}lw$),为一套陆源碎屑和内源碳酸盐岩组成的混合源浊流沉积,主要由富长石和硬砂质细粒砂岩、钙泥质板岩与灰岩组成互层,表现为多韵律复理石式建造;上巴颜喀拉群的新都桥组(T_3x)分布在则岔北部地区[11]。可见,区内石灰岩质纯、层厚,可溶性强,再加上位于节理发育的区域性断裂带,因此,喀斯特作用表现强烈。由于石灰岩和板岩的胶结程度和节理裂隙的发育差异较大,抗风化能力较强的石灰岩和抗风化能力较弱的板岩在空间上交替出露,经过漫长的地质时期,在内、外地质营力综合作用下,较软的板岩风化成负

表 3 则岔石林地质公园主体地层与岩性

Tab. 3 Main stratum and lithology of Zecha Shilin Geopark

年代地层单位		岩石地层	代号	岩性
三叠系	上三叠统	新都桥组	T_3x	深灰色、棕褐色砂岩、粉砂岩、板岩夹灰岩
	中三叠统			
	下三叠统	隆务河群	$T_{1-2}lw$	富长石和硬砂质细粒砂岩、钙泥质板岩与灰岩组成互层
泥盆系	上泥盆统	铁山群	D_3t	底部厚约 11 m 的钙质砂岩,下部深灰色薄层状泥质灰岩夹少量中厚层状灰岩,上部深灰色薄板状灰岩、泥质灰岩夹砾状灰岩、页岩及粉砂质板岩。产丰富的腕足类和珊瑚化石
	中泥盆统	古道岭组	D_2g	深灰色薄—中厚层状灰岩夹泥质灰岩,偶含燧石条带,底部有一层砂岩。富产珊瑚和腕足类化石
		当多沟组	D_2d	底部厚约 26 m 灰色中厚层状石英砂岩,下部深灰色中浮层状夹潜层状泥质灰岩,上部深灰色薄—中厚层状灰岩、泥质灰岩夹钙质板岩。多产珊瑚和腕足类化石
	下泥盆统		D_1	富白云质沉积

地形,而硬脆的石灰岩则形成高耸的石峰。不同的岩性形成了截然不同的地质遗迹,岩石软硬相间出现,造就了则岔石林的奇峰异石和峡谷瀑布。

此外,岩层的倾角对喀斯特地貌的形成起控制作用。一方面,倾角不同的岩层力学机制不同,断裂或裂隙的发育程度不同,对喀斯特发育有直接影响;另一方面,当倾角超过 30°时喀斯特地貌易滑塌。实测则岔石林地质公园内岩层产状平缓,倾角一般在 5°以下,既有利于发育共轭的垂直张剪节理,在垂直渗流带使岩体被切蚀分离形成石柱,又有利于高大石林的保存。

3.3 水文气候条件是形成高寒喀斯特的外动力

气候对区域外动力及其组合具有决定性影响。气候水热状况的不同组合将引起外动力性质、强度和组合状况的差异,从而形成不同的地貌类型及其组合。水是塑造喀斯特地貌的主要地质外营力。首先是水的溶蚀能力,其次是水的流动性。水中含 CO_2 时,水对石灰岩的溶解力很强。CO_2 与水化合形成 H_2CO_3,后者电解析出 H^+,与石灰岩中的 CO_3^{2-} 作用形成离子状态的溶解物质 Ca^{2+} 和 HCO_3^-,并随水流失。其化学反应如下[12]:

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$$

$$H_2CO_3 + CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

则岔地区属高原高山气候,高寒阴湿,冬季漫长,夏秋短暂,年平均气温 2.3 ℃,一月平均气温 -9.5 ℃,七月平均气温 12.4 ℃。受西南季风影响,雨热同期,降水多集中在 7 ~ 9 月,年均降水量为 633.9 mm[13],降水较丰沛。地质公园内冲沟发育,主要为则岔沟,多峡谷。主要河流为热乌曲河,发源于参宝山北麓,汇入洮河。则岔周围地下水丰富,出露多处山泉。区内地形高差相对较大,河水与泉水地表水位差也相对较大。充足的降水量与高水位差决定了水流动愈快,强烈的水循环交替,不断补充了新鲜的侵蚀性 CO_2,使岩溶进一步发展。由于气候变化大,风化作用和溶蚀作用为本区喀斯特地貌的形成和发展提供了条件。区内大面积出露的泥盆系、三叠系灰岩,由于胶结程度的不均匀、层理裂隙发育的差异、风化强度的差异等,在流水的溶蚀、侵蚀与寒冻剥蚀作用下,沿节理、裂隙溶蚀成大小不等的溶坑,进一步形成层面连续分布的溶洞,如神仙洞、鸟儿洞、石门洞等。山体进一步受到流水的溶蚀切割与风化崩塌作用,形成今日大小不同、千姿百态的峰岭石林景观。总的来看,本区形成的石林高大,而大型溶洞少,规模小,连通性差,钟乳石、石笋不发育,明显体现了气温低的北方岩溶的特点。

3.4 生物因素加速喀斯特化过程

生物通过机械风化和化学风化影响地貌发育。则岔石林地质公园森林植被覆盖良好,草场面积大,主要树种有冷杉、云杉、紫果云杉、柏木、桦木、松树等。国家保护植物有星叶草、桃儿七、黄芪 3 种。还有珍贵的中、藏药材冬虫夏草、贝母、藏红花等。随处可见松柏类植物扎根于岩石裂隙中,根系在生长过程中由细到粗、由短到长、由疏到密,致使岩石裂隙扩大以致崩裂,通过根劈作用导致岩石机械风化[14]。穴居动物则通过挖掘洞穴使岩石破碎而导致机械风化,对园内小型溶坑、溶洞的形成有一定影响。微生物对地貌形成的影响体现为化学风化作用,它们在新陈代谢和分解遗体的过程中会析出有机酸,而这种酸对岩石具有一定的腐蚀作用。此外,植物根系和土壤动物及微生物的呼吸作用增加了水中 CO_2 含量,对加速喀斯特过程有一定影响。

4 讨 论

则岔石林地质公园喀斯特地貌是在漫长的地质演化过程中,在内、外地质营力共同作用下形成的不可再生地质自然遗产。地质构造、节理裂隙的发育、岩石胶结程度的差异性,为喀斯特地貌的形成奠定了基础。在流水溶蚀、寒冻剥蚀和风化作用的雕凿下进一步发展修饰,主要表现为基岩陡壁多、石林石柱多且高大、洞穴少且连通性差、规模小的北方岩溶的特点。总之,在上述因素的共同作用下,形成了本区独具特色的高寒喀斯特地貌景观。

则岔石林地质公园因位于青藏高原东部边缘和典型的高寒喀斯特地貌景观,成为中国南、北方岩溶地貌进行系统对比研究的极佳场所。然而,目前国内外对中国喀斯特地貌的研究主要集中在西南和华中地区,尤其是路南石林。卢耀如、袁道先、陈安泽、李玉辉、曹建华等学者分别从区域分布、地质背景、形成机制、景观特征、资源评价、旅游开发与保护、岩溶石漠化等方面进行了较为系统的研究[15-19]。从单一研究向综合研究、从定性研究到定量研究、从单纯的逻辑推理到借助现代仪器设备测试分析,取得了丰硕的成果和深刻的认识。而对青藏高原及其东邻地区高海拔喀斯特景观研究极少,仅崔之久、李德文、高全洲等极少学者对青藏高原古岩溶进行研究[20-22],并提到了甘肃则岔、郎木寺等地可见岩墙—石林—石芽类覆盖型岩溶。针对则岔石林的专门研究几乎为空白,只在一些研究工作中对甘南、则岔地区有所涉及,如对区域地质地貌、自然地理、水文气象、动植物资源等进行研究的地质图、调查报告、规划方案、碌曲县志等。因此,本文对该地区喀斯特地貌类型的研究,探索其高寒喀斯特地貌的形成机制,不仅是进一步丰富和发展地质公园研究基础理论,完善我国高海拔地区岩溶地质系列地质遗迹科学研究的需要,也是促进地质公园进行地质遗迹资源合理开发与有效保护的现实需要。同时,高寒喀斯特的生态化对南方喀斯特沙漠化的治理具有良好的示范作用,对我国生态文明的建设具有重要意义。

至于则岔石林地质公园喀斯特是否属于古岩溶,尚需进一步研究。可以通过重结晶方解石的裂变径迹测年,也可以从气候代用指标进行分析,如相关沉积的化学成分、黏土矿物的 X-射线衍射、石英砂的表面结构等。此外,从地质背景、成因、演化发育模式、景观特征、资源保护等方面对中国南、北方岩溶进行对比,也是未来研究的方向。

参考文献(References)

[1] 梁旺俊,罗爱昌. 碌曲县志[M]. 兰州:甘肃文化出版社,2006:79-83. [LIANG Wangjun, LUO Aichang. Annals of Luqu County[M]. Lanzhou:Gansu Culture Press,2006:79-83.]

[2] 鄢志武,韩道山,罗伟,等. 甘肃碌曲则岔石林地质公园综合考察报告[R]. 武汉:中国地质大学,2013:35. [YAN Zhiwu, HAN Daoshan, LUO Wei, et al. Comprehensive report on Zecha Shilin Geopark in Luqu County Gansu Province[R]. Wuhan:China University of Geosciences,2013:35.]

[3] 陈安泽,钱方,李兴中,等. 中国喀斯特石林景观研究[M]. 北京:科学出版社,2011:19-20. [CHEN Anze, QIAN Fang, LI Xingzhong, et al. Karst stone forest landscapes in China[M]. Beijing:Science Press,2011:19-20.]

[4] 高全洲,崔之久,刘耕年,等. 晚新生代青藏高原岩溶地貌及其演化[J]. 古地理学报,2001,3(1):85-90+102. [GAO Quanzhou, CUI Zhijiu, LIU Gengnian, et al. Late Cenozoic Karst landforms on Qinghai-Tibet Plateau and their evolution[J]. Journal of Palaeogeography,2001,3(1):85-90+102.]

[5] 陈安泽,钱方,李兴中,等. 中国喀斯特石林景观研究[M]. 北京:科学出版社,2011:27. [CHEN Anze, QIAN Fang, LI Xingzhong, et al. Karst stone forest landscapes in China[M]. Beijing:Science Press,2011:27.]

[6] 王数,东野光亮. 地质学与地貌学[M]. 2 版. 北京:中国农业大学出版社,2013:97-99. [WANG Shu, DONGYE Guangliang. Geology and geomorphology[M]. 2nd ed. Beijing:China Agricultural University Press,2013:97-99.]

[7] 左俊辉,罗群,郭喜梅. 中国地貌三大阶梯对喀斯特发育的若干影响——以中国西南岩溶区为例[J]. 科技信息,2012,(18):210-211+213. [ZUO Junhui, LUO Qun, GUO Ximei. How the three gradient terrains of Chinese landform affect the development of Karst landform:Taking the Karst areas in southwest China as an example[J]. Science & Technology Information,2012,(18):210-211+213.]

[8] 崔之久,高全洲,刘耕年,等. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其起始高度[J]. 科学通报,1996,41(15):1402-1406. [CUI Zhijiu, GAO Quanzhou, LIU Gengnian, et al. Planation surface, Karst era and its height of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin,1996,41(15):1402-1406.]

[9] 贾承造,何登发,陆洁民. 中国喜马拉雅运动的期次及其动力学背景[J]. 石油与天然气地质,2004,25(2):121-125+169. [JIA Chengzao, HE Dengfa, LU Jiemin. Periods and dynamic background of China's Himalayan movement[J]. Oil & Gas Geology,2004,25(2):121-125+169.]

[10] 卢耀如,杰显义,张上林,等. 中国岩溶(喀斯特)发育规律及其若干水文地质工程地质条件[J]. 地质学报,1973,(1):121-136+141. [LU Yaoru, JIE Xianyi, ZHANG Shanglin, et al. Development laws and its hydrogeological engineering geological conditions of China Karst[J]. Acta Geologica Sinica,1973,(1):121-136+141.]

[11] 鄢志武,韩道山,罗伟,等. 甘肃碌曲则岔石林地质公园综合考

察报告[R].武汉:中国地质大学,2013:36 – 39.[YAN Zhiwu, HAN Daoshan, LUO Wei, et al. Comprehensive report on Zecha Shilin Geopark in Luqu County Gansu Province[R]. Wuhan:China University of Geosciences,2013:36 – 39.]

[12] 伍光和.自然地理学[M].4版.北京:高等教育出版社,2008:275.[WU Guanghe. Physical geography[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press,2008:275.]

[13] 景春刚.洮河—碌曲水文站水文特性分析[J].甘肃科技,2010,26(22):78 – 79.[JING Chungang. Analysis of hydrologic characteristics in Tao River-Luqu hydrologic station[J]. Gansu Science and Technology,2010,26(22):78 – 79.]

[14] 樊维,陈洪凯.裂隙岩体植物根劈机理研究[J].科技创新导报,2015,(35):46 – 47.[FAN Wei,CHEN Hongkai. Research on root wedging mechanism of plant in jointed rocks[J]. Science and Technology Innovation Herald,2015,(35):46 – 47.]

[15] 卢耀如.中国南方喀斯特发育基本规律的初步研究[J].地质学报,1965,45(1):108 – 129.[LU Yaoru. Preliminary investigation of some main features of Karst development in south China [J]. Acta Geologica Sinica,1965,45(1):108 – 129.]

[16] 袁道先.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1993:29 – 33.[YUAN Daoxian. Chinese Karst[M]. Beijing:Geological Publishing House,1993:29 – 33.]

[17] 陈安泽,余国元,王祥义.喀斯特旅游资源基础理论与开发研究[M].北京:地震出版社,2004:67 – 82.[CHEN Anze, YU Guoyuan, WANG Xiangyi. Basic theory and development research on Karst tourism resources[M]. Beijing: Seismological Press, 2004:67 – 82.]

[18] 李玉辉.中国云南石林岩溶形态特征与类型[J].中国岩溶,2002,21(3):165 – 172.[LI Yuhui. Morphological tipes and their features of Shilin Karst in Yunnan, China[J]. Carsologica Sinica, 2002,21(3):165 – 172.]

[19] CAO Jianhua, YUAN Daoxian, TONG Liqiang, et al. An overview of Karst ecosystem in southwest China: Current state and future management[J]. Journal of Resources and Ecology,2015,6(4):247 – 256.

[20] 崔之久,洪云,高全洲,等.青藏高原东北部古喀斯特过程与环境[J].地理学报,1996,51(5):408 – 417.[CUI Zhijiu, HONG Yun, GAO Quanzhou, et al. The process and environment of polaeokarst in the northeast area of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geographica Sinica,1996,51(5):408 – 417.]

[21] 李德文,崔之久,刘耕年.青藏高原古岩溶的存在及其与东邻地区岩溶的对比[J].中国岩溶,1999,18(4):25 – 34.[LI Dewen, CUI Zhijiu, LIU Gengnian. Existence of palaeokarst on Tibet Plateau and its correlation with the Karst of the eastern district [J]. Carsologica Sinica,1999,18(4):25 – 34.]

[22] 高全洲,崔之久,陶贞,等.青藏高原古岩溶的性质、发育时代和环境特征[J].地理学报,2002,57(3):267 – 274.[GAO Quanzhou, CUI Zhijiu, TAO Zhen, et al. The nature, formation age and genetic environment of the palaeokarst on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geographica Sinica,2002,57(3):267 – 274.]

Geomorphic types and formation mechanism of the Karst landform in Zecha Stone Forest Geopark

XU Jia-hong[1], YAN Zhi-wu[2], LIU Xiao-dan[3]

(1 *Department of Tourism Management, Xinzhou Normal University, Xinzhou* 034000, *Shanxi, China*;
2 *School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan* 430000, *Hubei, China*;
3 *Chinese People's Armed Police Gold Force Team* 7, *Yantai* 264000, *Shandong, China*)

Abstract: Zecha Stone Forest Geopark is located in Luqu County, Gansu Province, China. The landform in this area keeps the intact features of alpine-arctic karst, with typicality and rarity. In order to reveal its natural and scientific value, and to promote the natural resource development and landscape protection, the regional geological and geographic backgrounds of Luqu are briefed based on previous work and field investigation. The types of karst landform in Zecha Stone Forest Geopark have been introduced, which include the highland stone forest as the majority, the thin strip of sky as lightspot and the small karst caves as complementarities. The formation mechanism of the karst landform has been further analyzed from four aspects: tectonics, lithology, climate and biology. The results show that the tectonic movement, the development of joint fissures, and the difference of rocks cementation degrees laid a foundation for the formation of karst landscape. Moreover, under the alpine-arctic and dank climate condition with great changes, water corrosion, frost denudation, and weathering formed the unique alpine-arctic karst landscape in this area, which was characterized by many bedrocks and steep walls, tall stone forest and pillars, a few karst caves with poor connectivity and small size. The research provided some academic information of the karst landform in Zecha Stone Forest Geopark, which has certain significance in the scientific research on karst geological relics in high altitude areas of China. The ecologicalization of alpine-arctic karst provided a good reference for the governance of karst desertification in the south part of China.

Key words: Karst landform; formation mechanism; stone forest; Eastern Qinghai-Tibet Plateau; Luqu